

Eisenlose Linearantriebe

Funktionsweise & Auswahl und Auslegung

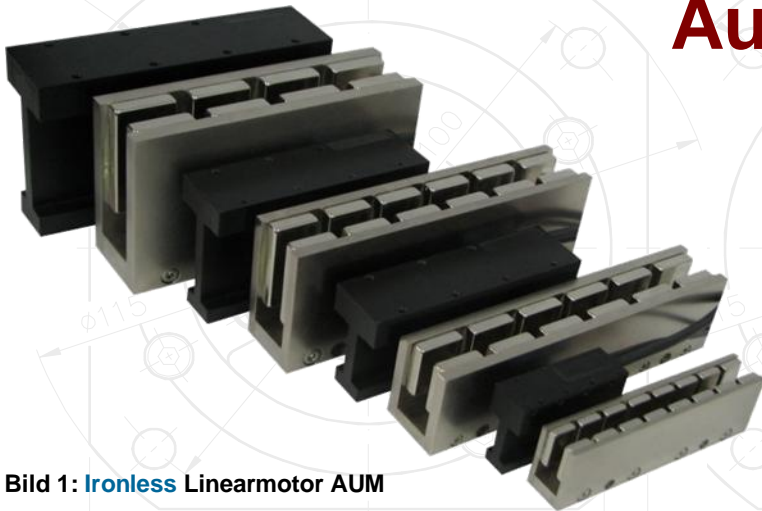


Bild 1: **Ironless** Linearmotor AUM

Der größte Anteil aller Antriebsaufgaben in modernen Maschinen erfordert eine lineare Bewegung. Ausgelöst durch den Trend zu immer kleineren bewegten Massen und hochdynamischer Positionierung stößt die klassische Lösung - rotative Bewegung wird mechanisch in eine lineare Bewegung umgewandelt - immer öfter an ihre physikalischen Grenzen. Stabile Regelkreise lassen sich bei Anforderungen, bei denen gleichzeitig Genauigkeit und Dynamik gefordert sind, nur mit spielfreien Direktantrieben erreichen.

Der **Ironcore** (eisenbehaftete) Linearmotor, bei dem ohne mechanische Umsetzung eine lineare Bewegung direkt erzeugt wird, hat sich im Markt etabliert. Die **Ironless** (eisenlose)-Technologie ist die konsequente Weiterentwicklung des Synchron-Linearmotortyps und bietet alle Vorteile eines Direktantriebes ohne störende Nebeneffekte. Damit ist dieser Antrieb ideal, um kleine Massen hochdynamisch und genau zu positionieren. Der folgende Beitrag erläutert und vergleicht diese Technologien.

Anforderungen an moderne Antriebe

Steigerung der Produktivität ist heute in allen Industriebereichen das entscheidende Thema. Leistungsfähigere und kompaktere Maschinen fordern von der Antriebstechnik:

- Maximale Geschwindigkeiten und Beschleunigungen
- Punktgenaue Positionierung - kein Überschwingen
- Optimale Massen Anpassung - Regelkreisstabilität
- Höchster Wirkungsgrad - geringe Betriebskosten



Diese Forderungen werden ohne Einschränkung durch Direktantriebe erfüllt. Kombiniert mit hochauflösenden direkten Linearmaßbändern und leistungsfähigen Digitalreglern setzen diese Antriebspakete neue Maßstäbe in Punkto Geschwindigkeit, Steifigkeit und Genauigkeit!

Typische Anwendungen

finden sich im Bereich Elektronik, Bestückungstechnik und Fertigungstechnik, wo kleinste Massen mit maximalen Taktzeiten bewegt werden müssen, bzw. für den Fertigungsprozess eine hohe Gleichlaufgüte notwendig ist.

Aber auch in anderen Bereichen wie der Werkzeugmaschinenindustrie, der Druckindustrie und ganz besonders im Bereich Messtechnik erlangen die Vorzüge dieser Technologie strategische Bedeutung.

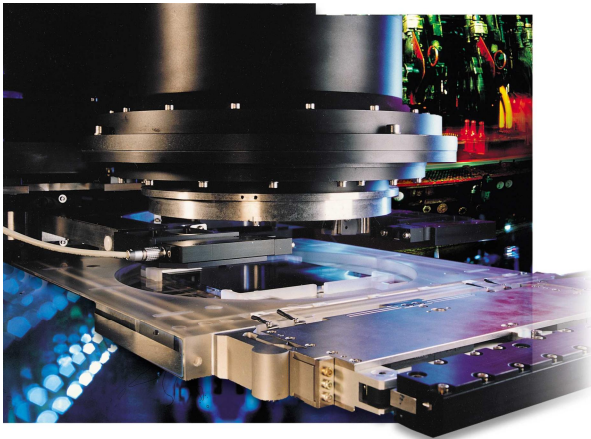


Bild 2:

Wafer-Stepper, der mit einem Beleuchtungsgerät ausgerüstet ist, das es erlaubt, die Auflösung auf unter $0,25\ \mu\text{m}$ zu erweitern, ohne die hervorragende Nachbildung und die hohe Produktivität zu beeinträchtigen. Diese hohe Genauigkeit konnte nur durch Verwendung von eisenlosen EC-Linearmotoren erzielt werden, wodurch deren heutige große Bedeutung in der Antriebstechnik eindrucksvoll unterstrichen wird.

Elektrische Linearmotoren (Synchronmotoren)

Bekanntlich besteht ein Rotationsmotor aus einem zylindrischen Stator mit einer Wicklung, in dem konzentrisch der Rotor läuft. Stellt man sich diesen Rotationsmotor nun aufgeschnitten und in der Ebene abgewickelt vor, so erhält man das Prinzip des Linearmotors.

Wie es beim Rotationsmotor zwei Elemente gibt, nämlich den Stator und den Rotor, so besteht der Linearmotor ebenfalls aus zwei Elementen, die als Primär- und Sekundärelement bezeichnet werden.

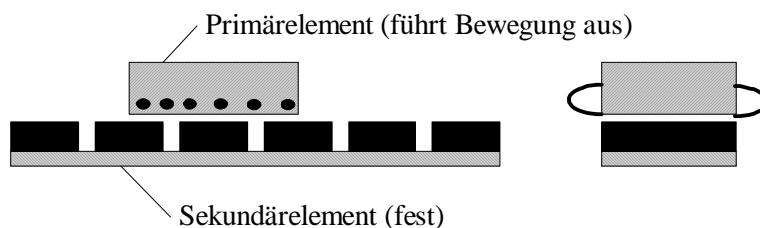


Bild 3: Linearmotor

Typischerweise bewegt sich das Primärteil und das Sekundärteil ist fest montiert. Der Aufbau kann aber auch umgekehrt erfolgen. Basierend auf den genannten beiden Ausführungsmöglichkeiten Wicklungsläufer und Wicklungsstator können verschiedene Typen von Linearmotoren gebaut werden, von denen im hier vorliegenden Fall nur die linearen elektronisch kommutierten Motoren von Interesse sind.

Da Asynchronmotoren bedingt durch ihre Konstruktion eine nur geringe Steifigkeit aufweisen, werden sie hauptsächlich im Bereich Transporttechnik eingesetzt, bei der die ausschlaggebende Größe der Verfahrweg ist.



Bürstenlose Linearmotoren **Ironcore*** und **Ironless***

Bei beiden Motortypen handelt es sich um permanenterregte Synchronmotoren. Als Magnetmaterial werden ausschließlich hochkoerzitive Neodyn-Magnete eingesetzt, die zum Korrosionsschutz vernickelt sind.

Beim **Ironless** Linearmotor (Bild 3), besteht das Sekundärteil (Stator) aus einem U-förmigen Profil, das auf beiden Seiten mit Magneten bestückt ist. Die Nord- und Südpole sind abwechselnd angeordnet, damit sich ein sinusförmiger Verlauf der Flussdichte über der Länge des Sekundärteils ergibt. Man spricht deshalb beim **Ironless** Linearmotor auch von einem Motor mit zweiseitiger Magnetanordnung.

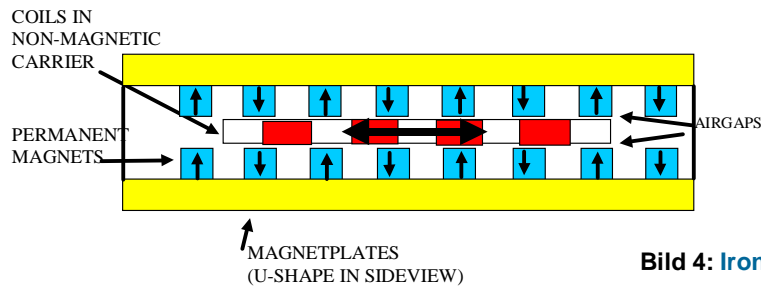


Bild 4: Ironless Linearmotor

Der eisenlose Läufer besteht aus einer dreiphasigen Wicklung, die in Epoxidharz eingegossen ist und von einem Standard-Servoregler angesteuert werden kann. Entscheidend für die Leistungsfähigkeit des eisenlosen Läufers ist die Wärmeabfuhr und der Schutz vor Überhitzung.

Modernste Materialien und patentierte Technologien erlauben heute den zuverlässigen Einsatz von eisenlosen Motoren. Das Kommutierungssignal für den Strom wird entweder durch ein Längenmesssystem geliefert oder durch drei Hallensoren erzeugt, die in den Läufer integriert sind.



Bild 5: Lineareinheit SGL

Bei dieser Motorkonstruktion ergibt sich der magnetische Widerstand aus der Dicke der Magnete, dem Luftspalt und der Dicke des Primärteils. Dieser relativ hohe Widerstand resultiert in einer geringeren Flussdichte als beim **Ironcore** Motor. Dadurch werden nur mittlere Spitzenkräfte und niedrige Dauerkräfte erzielt. Auch ist bei dieser Konstruktion die Wärmeabfuhr an die Umgebung aufgrund des fehlenden Eisens sehr gering.

Ein Ausgleich wird durch das symmetrische Design mit gegenüberliegenden Magneten und das Fehlen von magnetischem Material im Primärteil geschaffen. Hierdurch hat der Motor keinerlei magnetische Anziehungskraft, was einen einfachen mechanischen Aufbau erlaubt und keinerlei Rastmoment, was im Stromregelkreis zu einem konkurrenzlosen Gleichlauf führt.

Die einzige Kraft, die erzeugt wird, ist eine Vorschubkraft. Durch den hohen magnetischen Widerstand ist die Induktivität in der Spule minimal. Dadurch werden maximale Strom-/Kraftanstiegsgeschwindigkeiten möglich für schnellste Bewegungen und höchste Steifigkeit gegenüber Störkräften.

Um die Leistungsfähigkeit dieses Antriebes voll auszunutzen, sind schnelle Servoregler mit hoher Bandbreite erforderlich. Die hohen Magnetkosten begrenzen den Einsatz auf Anwendungen mit geringem Hub.

***Ironless = eisenlos**
***Ironcore = eisenbehaftet**

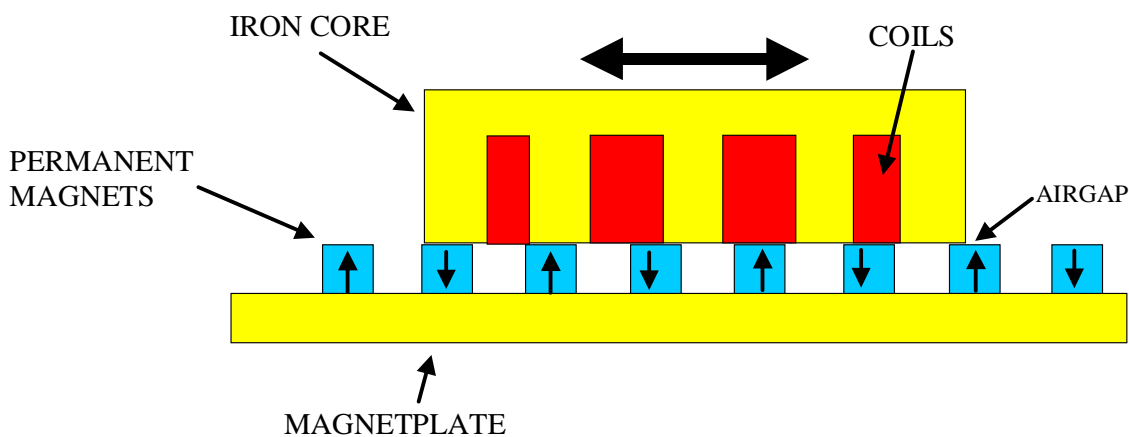
Demgegenüber besitzt der **Ironcore** Linearmotor nur eine einseitige Magnetanordnung. Hier besteht der Läufer ebenfalls aus einer dreiphasigen Wicklung, die jedoch in die Nuten eines Blechlaminats eingelegt und vergossen ist.

Der Stator ist hier eine flache ferromagnetische Stahlplatte, auf der die Permanentmagnete aufgeklebt sind und die als magnetischer Rückschluss dient. Natürlich ist auch hier eine exakte Führung des Läufers auf dem Stator erforderlich, damit stets ein konstanter Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärteil gewährleistet ist.

Der **Ironcore** Linearmotor mit seinem hohen Anteil an magnetischem Material und einem geringen Luftspalt erzeugt höchste Linearkräfte.

$$\text{Vereinfacht : } F = \Phi \cdot A \text{ (Feldstärke} \cdot \text{Fläche)}$$

Bedingt durch die Geometrie wird aber nur ein bestimmter Prozentsatz in Vorschubkraft umgesetzt. Die Anziehungskraft zwischen Primär- und Sekundärteil liegt meistens um den Faktor 2 über der Vorschubkraft. Dies ist bei dem mechanischen Aufbau zu berücksichtigen. Dieser Motortyp hat ein je nach Konstruktionstyp ein nicht zu vernachlässigendes Rastmoment.



Auch hier wird die 3-phasige Wicklung durch einen Servoregler angesteuert, und auch die Kommutierung des Spulenstroms erfolgt auf die gleiche Weise wie beim **Ironless** Motor. Da er wesentlich höhere Kräfte erzeugen kann als der **Ironless** Motor und sich die Wicklung daher stärker erwärmt, kann der Läufer auch mit einem patentierten Kühlsystem geliefert werden.

Dadurch kann die Effektivkraft des Linearmotors um bis zu 100% erhöht werden. Dies ist von entscheidender Bedeutung für dynamische Anwendungen mit hoher Einschaltdauer oder beim Einsatz in Präzisionsmaschinen zur Reduzierung des thermischen Einflusses durch den Motor.

Leistungsmerkmale von **Ironcore*** und **Ironless*** Linearmotoren

Beide Technologien zeichnen sich durch bestimmte Eigenschaften aus, die - richtig appliziert - zum optimalen Ergebnis führen! In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Eigenschaften gegenübergestellt, im oberen Teil der Tabelle sind die typischen Kennwerte für den Einsatz des jeweiligen Motortypes aufgeführt.

| Ironless Linearmotor | Ironcore Linearmotor |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • bewegte Massen <5 kg • Beschleunigung 10 G • Dauerkraft <500 N • Geschwindigkeit 7 m/s • Verfahrweg 0,5 m • Genauigkeit 0,5 μm | <ul style="list-style-type: none"> • bewegte Massen >50 kg • Beschleunigung 2 G • Dauerkraft >1000 N • Geschwindigkeit 3 m/s • Verfahrweg 2 m • Genauigkeit 5 μm |
| <ul style="list-style-type: none"> • keine Anziehungskräfte • kein Rastmoment • niedrige Dauerleistung • minimale bewegte Masse | <ul style="list-style-type: none"> • Anziehungskraft > 2 x F_{max} • Rastmomente • Gute Dauerleistung / Kühlung ! • Hohe bewegte Masse |

Ironcore Linearmotoren werden verstärkt beispielsweise für den Antrieb der Hauptachsen von Werkzeugmaschinen eingesetzt.

Ironless Linearmotoren hingegen werden für schnelle und hochgenaue Anwendungen, beispielsweise für Bestückungsmaschinen eingesetzt.

Um im Wechselspiel von höchster Linearkraft und geringstem Läufergewicht den Linearmotor optimal an die gestellte Aufgabe anpassen zu können, liefert A-Drive Technology sowohl **ironless** als auch **ironcore** Linearmotoren in verschiedenen Baureihen und Leistungsklassen.

Der Motortyp VPL ist in diesem Programm der dynamischste Motor mit der geringsten Läufermasse und den kleinsten Abmessungen. Da er mit 30 mm extrem schmal ist, ist er ideal für mehrere Antriebe auf engstem Raum und die Bestückung elektronischer Bauteile.



Bild 6:
Lineareinheit VPL 30

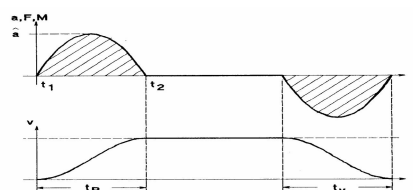
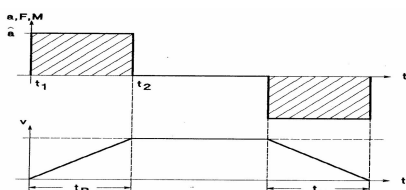
Auslegung eines Linearantriebes

Entscheidend für die dynamische Positionierung sind :

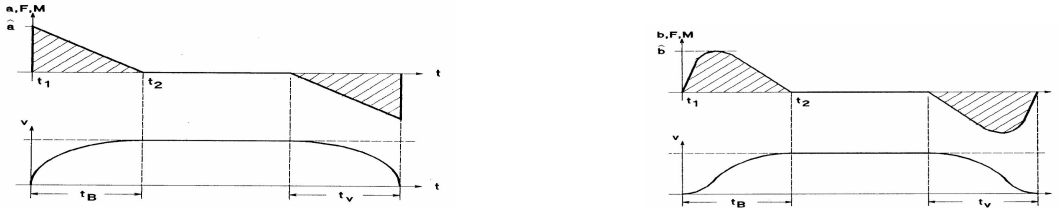
- Beschleunigungsphase in der Zeit t_a ,
- Bewegung bei konstanter (oder maximaler) Geschwindigkeit in der Zeit t_c
- Bremsphase in der Zeit t_d ,

Man unterscheidet zwischen zwei Verfahrprofilen :

Geschwindigkeitsprofil (Trapez), lange Bewegung! Ideal sinusförmig



Geschwindigkeitsprofil (Dreieck), kurze Bewegung



Gleichungen zur Berechnung der kinematischen Zusammenhänge:

Die verwendeten Formelzeichen sind in der Tabelle (siehe Textende) zusammengestellt. Die Geschwindigkeit v_a nach der Beschleunigungsphase ergibt sich zu:

$$v_a = a \cdot t_a \quad \text{und weiter:} \quad x_{a,d} = \frac{1}{2} a \cdot t_{a,d}^2 \quad x_c = v_{\max} \cdot t_c \Rightarrow t_c = \frac{x_c}{v_{\max}} = \frac{X - x_a - x_d}{v_{\max}}$$

Aus diesen Gleichungen können zwei praktische Beziehungen abgeleitet werden, nämlich einmal für die Abschätzung der Zeit für eine "kurze Bewegung", wenn also die Höchstgeschwindigkeit nicht erreicht wird:

$$t_{a,d} = \sqrt{\left(4 \cdot \frac{x_{a,d}}{a}\right)} \quad \text{und für eine "lange Bewegung:} \quad t_{acd} = \frac{X}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{a}$$

Für die Kräfte ergibt sich:

$$F_{a,d} = M \cdot a$$

$$\overset{!}{F}_l = \overset{!}{F}_{a,d} + \overset{!}{F}_f$$

$$F_{a,d} = 0 \Rightarrow (F_l = F_f)$$

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta t_i \cdot F_{ii}^2)}{T}} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta t_1 \cdot F_{i1}^2 + \Delta t_2 \cdot F_{i2}^2 + \Delta t_3 \cdot F_{i3}^2 + \dots)}{T}}$$

Wenn man nun die zu bewegendende Masse kennt und einen bestimmten Linearmotor ausgewählt hat, kann mit der folgenden Beziehung die Beschleunigung abgeschätzt werden:

$$a \approx \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{peak}}{M} \quad \text{Die Verlustwärme ergibt sich zu:} \quad Q = 1,3 \cdot \frac{F_{rms}}{S_{25}}$$

Die mittlere Kraftkonstante des Motors:

$$K_{rms} = \frac{F_{rms}}{I_{cont}}$$

Abschätzung des benötigten höchsten Stroms:

$$I_{peak} = 1,1 \cdot \frac{\max[F_{tot}]}{K_{rms}}$$



Berechnungsbeispiel:

Ein Greifer platziert Komponenten und bewegt sich kontinuierlich hin und her über einen Weg $X = 0,6$ m. Die Dauer einer einzelnen Bewegung über diese 0,6 m darf höchstens 0,5 s betragen. An beiden Enden der Bewegung werden 0,5 s für den Abschluss der Bewegung und die Tätigkeit des Greifers benötigt. Weitere Parameter sind:

- Masse der zu bewegenden Last: $M = 0,5$ kg + 1,0 kg Schlittengewicht
- Reibungskraft: $F_f = 5$ N
- Luftkühlung: große Kühlfläche
- Genauigkeit: ca. 0,005 mm
- Höchstgeschwindigkeit: $v_{\max} = 5$ m/s

Im ersten Schritt wird der Fall des schwierigsten Arbeitsspiels ausgesucht, das bei der Anwendung auftreten kann. Im Allgemeinen tritt dies in zwei Situationen auf

- wenn der Motor eine hohe Haltekraft aufbringen muss
- wenn der Motor kontinuierlich beschleunigt und gebremst wird ("kurze Bewegung") mit nur kurzer Stillstandszeit

Jetzt müssen die Größen während des schwierigsten Arbeitsspiels bestimmt werden. Im vorliegenden Fall gibt es nur ein Arbeitsspiel. Es wird ein Motor mit einer Spitzenkraft von 160 N ausgewählt. Die max. Beschleunigung dieses Motors ergibt sich zu

$$\frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{peak}}}{M} = \frac{3}{4} \cdot \frac{160\text{N}}{1,5\text{kg}} = 106,7\text{m/s}^2$$

Die Gleichung für die Zeit zum Zurücklegen der gewünschten Strecke hängt davon ab, ob der Linearmotor seine Höchstgeschwindigkeit v_{\max} während der Bewegung erreicht. Im Fall einer "kurzen Bewegung" (v_{\max} wird nicht erreicht):

$$t_a = \sqrt{\frac{2 \cdot x_a}{a}} = \sqrt{\frac{0,6}{106\text{m/s}^2}} = 0,075\text{s}$$

In diesem Fall ist die Geschwindigkeit nach der Zeit t_a :

$$v_a = a \cdot t_a = 106\text{m/s}^2 \cdot 0,075\text{s} \approx 8\text{m/s}$$

Die berechnete Geschwindigkeit v_a übersteigt die für die Anwendung geforderte Höchstgeschwindigkeit ($v_{\max} = 5$ m/s). Es ist offensichtlich, dass der gewählte Linearmotor die Höchstgeschwindigkeit irgendwo während des Vorgangs erreicht.

In diesem Fall muss die während einer "langen Bewegung" benötigte Zeit berechnet werden:

$$t_{acd} = \frac{X}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{a} = \frac{0,6}{5} + \frac{5}{106} = 0,167\text{s}$$



| Symbol | Einheit | Bezeichnung |
|--------------------|---------------|---|
| t | s | Zeit |
| t_a, t_d, t_{ad} | | benötigte Zeit für Beschleunigung; Abbremsen oder beide |
| t_c | | benötigte Zeit für die Strecke bei konstanter Geschwindigkeit |
| Dt | | geringe Zeitdifferenz |
| T | | Gesamtzeit |
| v | m/s | Geschwindigkeit |
| v_a | | Anfahrtgeschwindigkeit nach Stillstand |
| v_{max} | | Höchstgeschwindigkeit |
| a | m/s^2 | Beschleunigung |
| x | m | Wegstrecke |
| x_a, x_d, x_c | | Weg bei Beschleunigung, Bremsen und konstanter Geschw. |
| X | | Gesamtstrecke bei kombinierter Bewegung |
| F | N | Kraft |
| F_a, F_d, F_{ad} | | Kraft für Beschleunigungs-/Bremsvorgang |
| F_l | | durch die Last ausgeübte Kraft |
| F_{peak} | | Spitzenkraft |
| F_{cont} | | Dauerkraft |
| F_f | | Reibungskraft |
| F_{rms} | | mittlere Kraft während einer längeren Periode |
| M | kg | Masse der Last |
| Q | W | Verlustleistung |
| S_{25} | N^2/W | Motorkonstante bei 25 °C |
| S_{TW} | | Motorkonstante bei Arbeitstemperatur |
| K | N/A | Kraftkonstante des Motors |
| K_{rms} | | mittlere Kraftkonstante (vom Strom abhängig) |
| I | A | Strom |
| I_{peak} | | Spitzenstrom |
| I_{cont} | | Dauerstrom |
| R_{th} | $^{\circ}C/W$ | thermischer Widerstand |
| T_w | $^{\circ}C$ | Arbeitstemperatur |

